文章编号:1671-251X(2013)08-0076-04　　DOI:
金鑫,嵇丽丽.开关磁阻风力发电系统研究[J].工矿自动化,2013,39(8):76-79.

开关磁阻风力发电系统研究

金鑫[1],　嵇丽丽[2]

(1.江苏师范大学 电气工程及自动化学院,江苏 徐州　221116;
2.中国矿业大学 信息与电气工程学院,江苏 徐州　221008)

摘要:针对传统的基于异步发电机、双馈发电机和永磁同步发电机的风力发电系统稳定性较差,风力发电系统的实验研究需要诸多条件、不易实现的问题,提出了一种在不具备风场实验条件情况下进行基于开关磁阻发电机的风力发电系统研究的方法,即采用直流电动机模拟风力机来进行开关磁阻发电系统的实验。建立了直流电动机模拟风力机的仿真模型,介绍了基于该模型的开关磁阻风力发电系统最大输出功率闭环控制方案。仿真结果表明,该控制方案能使所建立的发电系统快速进行功率调节并进入稳态工作。

关键词:风力发电机;开关磁阻发电机;直流电动机;输出功率;闭环控制
中图分类号:TD67　　文献标志码:A　　网络出版时间:
网络出版地址:

Research of switched reluctance wind power generating system

JIN Xin[1],　JI Li-li[2]

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;
2. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In view of problems of bad stability of wind power generating system based on asynchronous generator, doubly-fed generator and permanent magnet synchronous generator, needing many conditions and being difficult to realize in experimental research of wind power generating system, the paper proposed a research method of wind power generating system based on switched reluctance generator under situation of no experimental condition of wind farm, that is using DC motor to simulate wind generator to make experiment for switched reluctance generating system. It built simulation model of DC motor simulating wind generator, and introduced close-loop control scheme of the maximum output power of switched reluctance generating system based on the model. The simulation result shows that the control scheme enables the established power generating system into power adjustment and stable running.

Key words: wind generator; switched reluctance generator; DC motor; output power; close-loop control

0　引言

目前,风力发电机一般采用普通异步发电机、双馈发电机和永磁同步发电机。但由于受风速变化的随机性、风轮机和发电机之间安装有增速齿轮箱、永磁材料退磁现象等诸多因素的限制,发电系统的稳定性较差。开关磁阻发电机可省掉增速齿轮箱,具有结构简单、低速运行性能好、输出为直流电、易于实现并网等特点[1-2]。鉴此,本文结合风力机和直流电动机的运行原理,给出了在不具备风场实验条件

收稿日期:2013-04-26。
基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK2011205)。
作者简介:金鑫(1980—),男(满族),河北承德人,讲师,硕士,主要从事自动化专业的教学与科研工作,E-mail:jinxin8851@163.com。

的情况下开展开关磁阻风力发电系统研究的方法，即采用直流电动机模拟风力机进行开关磁阻发电系统的实验，实现了系统最大净功率输出的闭环控制[3-4]。

1　开关磁阻风力发电系统

1.1　系统组成

开关磁阻风力发电系统实现机电能量转换的核心部件是开关磁阻发电机，还包括风力机、功率变换器、检测装置、控制器和蓄电池等，如图 1 所示。

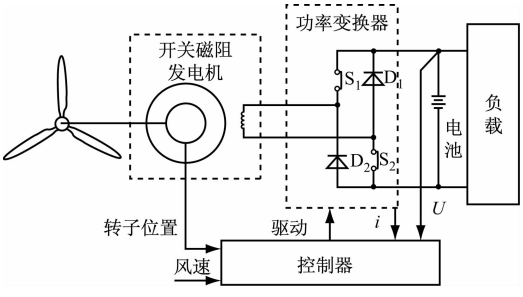


图 1　开关磁阻风力发电系统组成

风能是一个典型的随机变量，不同风速 v 下风力机输出功率与转速的关系如图 2 所示，从图中可看出，风力机在某一转速时都存在一个最大输出功率点，转速过大或过小输出功率都会降低。

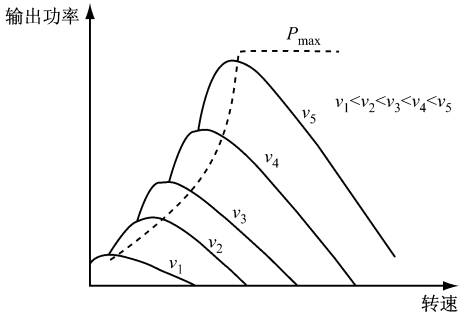


图 2　不同风速下风力机输出功率与转速的关系曲线

一般的空气动力学实验都是依靠风洞或风场来完成的，但实验所需诸多条件给风力发电系统的研究带来很大不便，如何模拟出风力机的实际工作特性，成为风力发电系统研究的一个重要课题。直流电动机具有优越的控制性能，可通过改变电枢电压 U 的值，使电动机运行在最大功率曲线上的任意点上，从而模拟出风力机的最大输出功率特性。根据上述思路，建立了如图 3 所示的采用直流电动机模拟风力机的仿真模型，期望通过仿真来验证直流电动机能否工作在表 1 所示的风力机对应的点上。

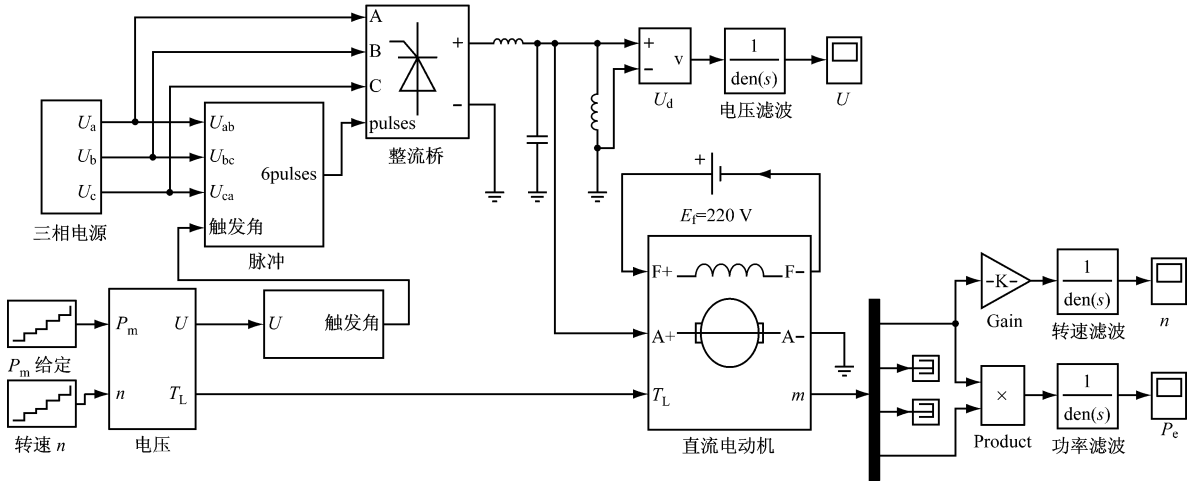


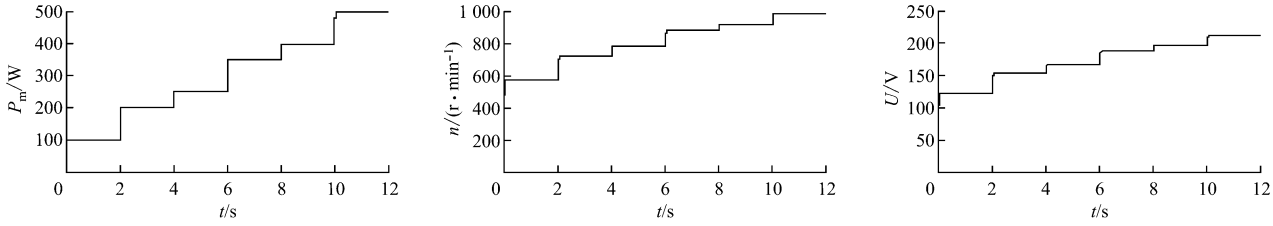
图 3　采用直流电动机模拟风力机的仿真模型

表 1　风力机工作点

输出功率/W	转速/(r·min^{-1})	电枢电压/V
100	580	120
200	725	155
300	820	175
400	915	190
500	1 000	215

仿真得到的直流电动机输出功率 P_m、转速 n、电枢电压 U 的波形如图 4 所示。

从仿真结果可看出，通过改变晶闸管触发角来改变加于直流电动机电枢的端电压，完全可以达到调节输出功率和输出转速的目的，使输出能够准确跟随给定的变化，保证了直流电动机输出功率特性能够准确模拟任意所需风力机的功率特性。



(a) 输出功率波形 (b) 转速波形 (c) 电枢电压波形

图 4 直流电动机模拟风力机的仿真结果

1.2 开关磁阻发电机模型

开关磁阻电机处于发电状态的分析方法类似于电动状态，只要加大开通角，使相电流在$\partial L/\partial\theta<0$区($L$ 为开关磁阻电机相电感，θ 为定转子相对位置)出现，即可产生负转矩[5]，若靠风力机维持开关磁阻电机转动，就可使电机工作于发电状态。假设开关磁阻发电机磁路不饱和，建立一个三相他励开关磁阻发电机模型，如图 5 所示。A，B，C 三相模块的输入分别为转速 ω、励磁电压 U_s、开通角 θ_1、关断角 θ_2、发电电压 U_c、总转角 θ；输出分别为相电磁转矩 T_a、相绕组电流 i_a、相励磁电流 i_{ae}、相发电电流 i_{ag}、相励磁吸收功率 P_{ae}、相发电功率 P_{ag}。A，B，C 三相模块由几个子模块构成，子模块分别为功率变换器模块、转子位置角计算模块、相电感及电感导数计算模块、电流计算模块、转矩计算模块、功率计算模块。

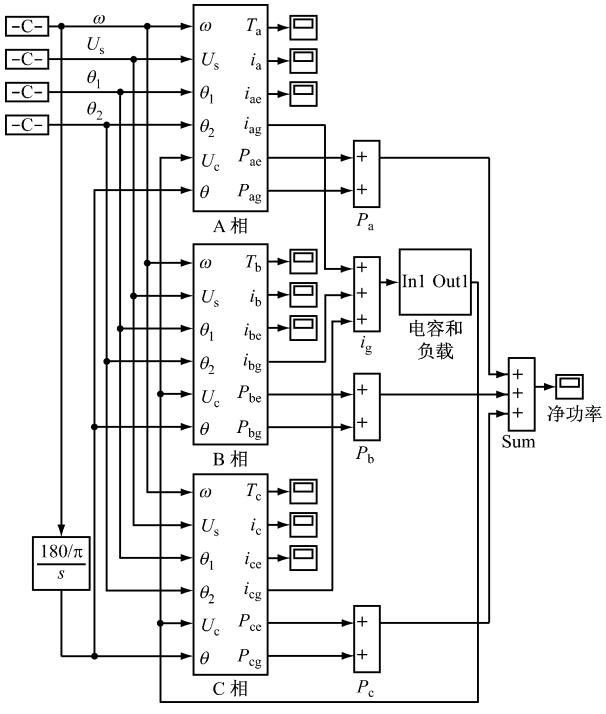


图 5 三相开关磁阻发电机仿真模型

2 开关磁阻风力发电系统

2.1 控制方式

开关磁阻发电机不同于一般发电机，励磁发电交替运行，发电机的控制变量和电动机一样，主要包括开通及关断角、励磁电压、电流上下限幅值，可采用角度位置控制(APC)、脉冲宽度控制(PWM)和电流斩波控制(CCC)3 种方法控制发电机输出功率。

图 6 和图 7 是开关磁阻发电机转速为 1 000 r/min 时，采用 APC 方法得到的关断角固定(31°)和开通角固定(18°)2 种情况下的 A 相电流 i_a 波形。

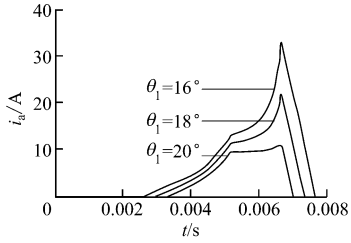


图 6 APC 方式下不同开通角的 A 相电流波形

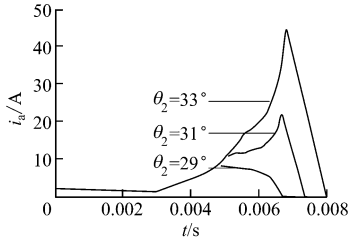


图 7 APC 方式下不同关断角的 A 相电流波形

从图 6 可看出，减小开通角，励磁时间变长，相电流幅值相应增加。从图 7 可看出，关断角越大，励磁时间越长，且相电流峰值显著上升。比较图 6 和图 7 可看出，开关磁阻电机处于发电状态时，相电流对关断角的变化较敏感，所以一般多针对不同转速优选关断角，调节开通角实现发电控制。

图 8 是在 $\theta_1=18°$、$\theta_2=31°$、转速为 400 r/min、PWM 信号频率为 1 kHz 时得到的 A 相电流 i_a 波形(图中给出了占空比D分别为0.6、0.7、0.8 时的

波形）。从图 8 可看出，提高占空比可提高励磁电压，进而提高励磁电流及输出功率。

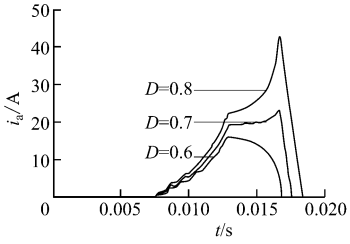


图 8　PWM 方式下不同占空比的 A 相电流波形

当 $\theta_1=18°$、$\theta_2=31°$、转速为 400 r/min 时，得到了在不同电流上下限幅值下（即 i_H/i_L）A 相电流 i_a 波形，如图 9 所示。从图 9 可看出，电流上下限幅值越大，励磁电流越大，相电流的幅值越大。

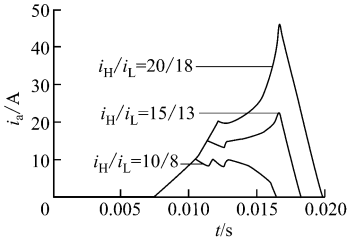


图 9　CCC 方式下 A 相电流波形

2.2　系统仿真

由于风力机功率特性的特点，为提高系统能量转化效率，可控制发电系统在风能变化的情况下仍能工作于最大功率点上。本文采用风速跟随方案，即根据测风装置观测到的风速，结合风力机最大功率曲线得到给定功率，然后与发电机实际输出功率进行比较，采用模糊 PI 控制器计算出相电流的开通关断角，从而控制发电机的电流输出，也就改变了系统的输出功率。

本文对一台三相 12/8 结构的开关磁阻发电机带阻性负载进行了多组风速仿真，仿真结果表明此方案是可行的。鉴于篇幅有限，文中选取其中一组风速为 5 m/s 时所得到的仿真波形（图 10—图 12）进行简要说明。图 10 中，P_o 为发电总功率扣除吸收的励磁功率而得到的净发电功率。发电初始阶段系统励磁造成的吸收功率大于发出功率，结合所选定的电压电流参考方向，所以净功率为正，整个系统吸收功率；而正式发电阶段的发电总功率远大于励磁功率，系统净功率为负，主要是电压电流方向不相关的原因，实际系统是发出功率的。

从图 11 可看出，开始时的发电电压 U_c 很低但上升很快，由于系统发电电压 U_c 的上升，系统发出功率就超过了励磁的吸收功率，经过很短时间，系统

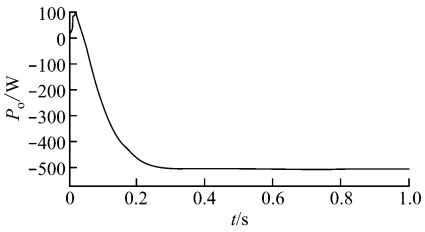


图 10　发电机净输出功率波形

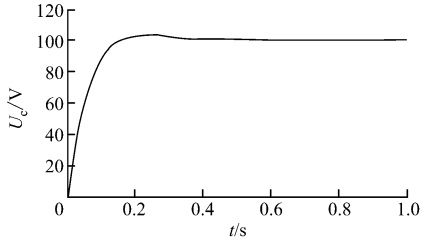


图 11　发电机发电电压波形

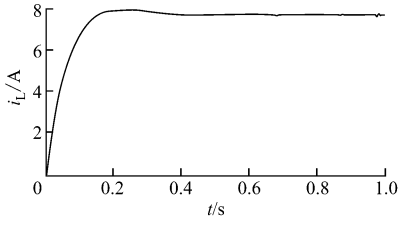


图 12　负载电流波形

的净功率就稳定在某一值上，这表明所建立的发电系统能快速进行功率调节并进入稳态工作状态。

3　结语

应用直流电动机优越的控制性能，对风力机的功率特性进行了模拟，为实验室中风力发电提供了一个解决原动机的有效途径，并对开关磁阻发电系统采用风速检测方法进行了最大功率跟随控制仿真。从仿真结果看，波形符合理论分析，功率和电压响应都很快速，而且超调很小，功率跟随效果令人满意，进一步证明了系统的可行性。

参考文献：

[1]　熊立新，徐丙垠，高厚磊，等. 一种开关磁阻风力发电机最大风能跟踪方法[J]. 电工技术学报，2009，24(11)：1-7.

[2]　叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京：机械工业出版社，2006.

[3]　曹志亮，张琦雪，朱学忠，等. 开关磁阻风力发电系统[J]. 中小型电机，2001，28(2)：1-4.

[4]　刘迪吉，曲民兴，朱学忠，等. 开关磁阻发电机[J]. 南京航空航天大学学报，2003，35(2)：109-115.

[5]　陈昊. 开关磁阻调速电动机的原理设计应用[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，2000：6-16.